移動ロボットを用いた双眼独立なステレオカメラ法位置計測による 不整地面上での相対位置取得法*

笹木 亮** 牛丸貴之*** 山谷崇浩*** 池本有助**

Local Position Measurement of Moving Robots System Using Stereo Measurement on the Uneven Floor

Tohru SASAKI, Takayuki USHIMARU, Takahiro YAMATANI and Yusuke IKEMOTO

The stereo measurement has been used to identify the positions of a target object. In a general way of the stereo measurement by single robot, multiple cameras are used in which their position and posture are fixed. However, it is difficult to detect the object which is occluded by other objects, and is moving over a wide range. In this paper, we propose a novel method for measuring a mobile robot's relative position and posture. For the stereo measurement, it is required for robots to measure precisely informations about the distance between cameras, as well as the relative posture of the cameras. To hold their positional and posture informations, the robot was equipped with three identification markers and share the images taken by another robot. To confirm the effectiveness of the proposed method, we experiments the stereo measurement by real two robots on uneven floor.

Key words: stereo-camera measurements method, mobile robot

1. 緒 言

人へのサービスを行う自律移動型ロボットでは、環境におけるロボット自身の位置とサービスを行う対象の位置、および障害物等の環境の位置情報を得る必要がある。このためのロボットの位置情報取得には様々な研究^{1)~9)}がなされており、中でもステレオカメラ法が多く利用されている。ステレオカメラ法ではカメラ間距離と光軸の相対姿勢を得る必要がある。これに対し、カメラをマニピュレータに実装して手先の位置と姿勢を得る手法⁴⁾や、画像平面上の対応点を画像差分⁵⁾や輝度の特徴より得る手法⁶⁾、エピポーラ平面より求める方法⁷⁾⁸⁾などが研究されている。筆者らは先に測定対象との相対位置を、2台のロボットに搭載したカメラの画像情報より互いの位置・姿勢を取得してステレオ計測する手法⁹⁾を提案した。この手法では複数のロボットにカメラと識別マークを実装することでカメラ間の相対位置と相対姿勢を取得でき、視点を自由に移動することで位置測定可能な領域の拡大と位置計測精度の向上を図れるメリットがある。しかし、床面を理想的な凹凸の無い平面と仮定しており、ロボットの姿勢のロール角とピッチ角の姿勢変化を無視しているが、実際の環境では2台のロボットの設置面に高低差や傾きが生じる。例えば住宅では襖の段差や絨毯など微小な段差や、生活用品が床面上に放置されていることが予想される。移動ロボットの自己位置推定に多く用いられるデッドレコニングの場合、床面の凹凸に影響を受け易く、推定位置の補正が必要となる。また画像計測では光源の位置に影響を受け易い問題もある。

これに対し本研究では、ロボットに実装された識別マークを互いに撮影し、画像処理を用いることで、ステレオカメラ法計測に必要なロボット同士の相対的な位置・姿勢を、床面の傾斜や高低差が生じて、正確に計測する手法を開発した。加速度

センサ等を異なる2つのロボットに実装する場合、相対的な姿勢と位置を求めるためには互いに位置と姿勢の較正を行う必要があるが、本手法ではデッドレコニング等によらず、ロボット同士の相対的な位置と姿勢を直接求めることができる。

本報では、この手法により傾斜がある床面上でのロボット同士の位置・姿勢計測と、ステレオカメラ法による対象物の位置計測の評価を行い、本方式の有効性について検討した。加えて画像計測時の光源位置の影響や、デッドレコニングのみの場合との比較についても検討を行った。

2. 本研究手法によるステレオカメラ法位置計測

本研究では単眼カメラを搭載した2台以上の移動ロボットにより、ステレオカメラ法を用いて測定対象の位置計測を行う。

カメラを搭載した2台の双輪型ロボット1, 2が静止している場合の座標系を図1(a)に示す。XYZ系の原点Oにロボット1座標系 (X_{r1}, Y_{r1}, Z_{r1}) の原点 (O_{r1}) を取り、ロボット2座標系 (X_{r2}, Y_{r2}, Z_{r2}) の原点 O_{r2} のXZ平面への写像点 O'_{r2} をX軸が通るとする。ロボット2原点はロボット1原点に対し、距離 b だけ離れており、Y軸方向に高低差 h_{r2} を持つ。 X_{r1}, Y_{r1}, Z_{r1} 座標系において、 X_{r1} 軸は車軸に平行で、 Y_{r1} 軸はロボットの旋回中心を通るものとする。またロボット i に搭載されているカメラ i の座標系を X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci} とおく。カメラ i の撮画像平面の座標を u_i, v_i 系 $(i=1, 2)$ として表す。 u_i, v_i 系は X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci} 座標系において $(0, 0, f_i)$ なる点を原点とする。 f_i はカメラ i の焦点距離である。 X_{ci}, Y_{ci} 軸は撮画像平面上の u_i, v_i 軸に平行であり、カメラ光軸を Z_{ci} 軸とする。 X_{r1}, Y_{r1}, Z_{r1} 座標系において X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci} 座標系の原点は Y_{r1} 軸方向に h 、 Z_{r1} 軸方向に g だけ離れている。カメラ i はロボット i 座標系に対し、仰角 α_i と旋回角 β_i を有する。

ここで測定対象を点Aとし、XYZ座標系における空間座標 (x, y, z) を求める。カメラ i の撮画像平面における点Aの投影点を点 A_{ci} とし、 X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci} 座標系で表わす。点 A_{ci} は投影点を u_i, v_i 系で表わした点である。その他を以下に定義する。

* 原稿受付 平成25年3月25日

** 正会員 富山大学大学院 (富山県富山市五福3190)

*** 学生員 富山大学大学院

Fig.1 Model of stereo-camera measurement using camera on the robot

b' : カメラ 1, 2 座標原点の XZ 平面への写像点間距離 (基線長), β' : b' の線分が X 軸となす角度,

s : スケールファクタ, κ : レンズ歪み係数,

u_{pi}, v_{pi} : カメラ i の撮画像平面上における画素座標,

a_{ci}, a_{ri} : カメラ i の撮画像平面上における光軸のずれ量,

h_{r2} : XZ 平面から点 O_{r2} までの高さ ($O'_{r2}-O_{r2}$ 間距離),

$\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$: XYZ 系に対する $X_{ri}Y_{ri}Z_{ri}$ 系の各軸の傾き.

$R(\chi, \varphi)$ を χ 軸周りに φ だけ回転する 3×3 の回転行列とする. これより, XYZ 座標系-ロボット i 座標系の同次変換行列は下式で表される.

$$T_{ri} = \begin{pmatrix} R(Y, \theta_{yi}) R(Z, \theta_{zi}) R(X, \theta_{xi}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ロボット i 座標系におけるカメラ i の原点座標 ${}^i\mathbf{p}_{ci}$ は

$${}^i\mathbf{p}_{ci} = \begin{pmatrix} 0 & h & g \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

であり, ロボット i 座標系-カメラ i 座標系の同次変換行列は

$${}^{ri}T_{ci} = \begin{pmatrix} R(X_{ri}, \alpha_i) R(Y_{ri}, \beta_i) & {}^i\mathbf{p}_{ci} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表せる. ここで図 1(b) のように, カメラ 1, 2 の座標原点を結ぶ線分に平行で XZ 平面に垂直な平面を考える. この平面を仮想画像平面と呼称する. 各カメラの画像平面から仮想画像平面へ座標変換した後のカメラ i 座標系から XYZ 座標系の同次変換行列は下式となる.

$${}^{tci}T_i = \begin{pmatrix} R(Y_i, -\beta') & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ゆえに, 座標変換後のカメラ i 座標系から変換前への同次変換行列 ${}^{tci}T_{ci}$ は ${}^{tci}T_{ci} = {}^{tci}T_i {}^{ri}T_{ci}$ となる.

また, カメラ i 座標系における撮画像平面上の投影点は

$${}^{ci}\mathbf{p}_{Aci} = \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta s & 0 & -\eta a_{ci}s & 0 \\ 0 & -\eta s & \eta a_{ci}s & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{pi} \\ v_{pi} \\ f \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\text{ここで } \eta = \frac{1}{1 + \kappa((u_{pi} - a_{ci})^2 + (a_{ri} - v_{pi})^2)}$$

で表される. ここで, (u_i, v_i) は画像情報 u_{pi}, v_{pi} より与えられる. これより, 座標変換後の点 A の仮想画像平面上の投影点座標 ${}^{tci}\mathbf{p}_{Aci}$ は下式で表される.

$${}^{tci}\mathbf{p}_{Aci} = {}^{tci}T_{ci} {}^{ci}\mathbf{p}_{Aci} = \begin{pmatrix} x_{Aci} & y_{Aci} & z_{Aci} & 1 \end{pmatrix}^T \quad (6)$$

この点の仮想画像平面への写像を投影点とし, その位置ベクトルを ${}^{tci}\mathbf{p}_{Aci} = \begin{pmatrix} x_{Aci} & y_{Aci} & z_{Aci} & 1 \end{pmatrix}^T$ として, 光軸が平行な

場合のステレオカメラ法の式を用いると, カメラ 1 座標系における A 点の位置ベクトル ${}^{tci}\mathbf{p}_{Aci}$ は下式となる.

$${}^{tci}\mathbf{p}_{Aci} = \begin{pmatrix} \frac{b'x_{Aci1}}{x_{Aci1} - x_{Aci2}} & \frac{b'y_{Aci1}}{x_{Aci1} - x_{Aci2}} & \frac{b'f_1}{x_{Aci1} - x_{Aci2}} & 1 \end{pmatrix}^T \quad (7)$$

ゆえに, XYZ 座標系における A 点の位置ベクトル $\mathbf{p}_A$ は下式から得られる.

$$\mathbf{p}_A = \begin{pmatrix} x & y & z & 1 \end{pmatrix}^T = T_{ri} {}^{ri}T_{ci} {}^{tci}\mathbf{p}_{Aci} \quad (8)$$

これより, ロボット 1, 2 に搭載されたカメラ 1, 2 の画像において測定対象を抽出し, 撮画像平面上における測定対象の画素座標 $(u_{pi}, v_{pi})^T$ を得れば, XYZ 座標系における測定対象の空間位置を得ることができる. すなわち, XYZ 座標系の原点をロボット 1 の初期位置座標とすることで, 初期位置座標からのロボット 1 の移動距離と姿勢変化から測定対象の位置を表すことができる.

3. 3 個の識別マークを用いた相対位置・姿勢取得方法

ステレオカメラ法による位置計測を行うために必要なカメラ間距離と光軸の相対姿勢を得る方法について検討を行った.

2 台の移動ロボットに搭載されたカメラを用いてステレオカメラ法位置計測を行うために, 互いのロボットの相対位置と相対姿勢を求めるには, 理想的な平面上においては 2 個の大きさが既知の識別マークを, やはり既知の距離を与えてロボット上に搭載し, これを撮影することで可能となる⁹⁾. しかし実際の環境には床面の凹凸や段差などがあり, ロボットが接地する床面に傾きや高低差が生じる可能性がある. そのため上記のような仮定ではステレオカメラ法を用いて正確に位置測定できる条件が限定される. 識別マークが 2 個の場合, 2 つの識別マーク中心を通る線分を旋回軸とした姿勢は計測不可能となる.

このため, 2 台のロボットの高さが異なる位置にあり, ロボットの姿勢が 3 軸周りにそれぞれ異なる姿勢の場合の, 相対姿勢および相対位置取得方法を検討する. 1 台の移動ロボットに 3 個の識別マークを搭載し, 識別マークの直径および中心間距離を画像計測して相対位置と相対姿勢の計測する手法を考案した. 図 2 のように識別マーク $i1$ と識別マーク $i2$ を i 番目のロボット座標系 $X_{ri}Y_{ri}Z_{ri}$ の Y_{ri} (旋回) 軸を挟んで X_{ri} 方向に距離 L_i だけ等距離で離れ, かつロボット座標原点 O_{ri} から Y_{ri} 方向に高さ h_{oi} の位置に設置する. さらに識別マーク $i3$ は識別マーク $i1$ の直上 (Y_{ri} 方向) に高さ H_i の位置に設置する. このときロボット 1 に搭載されたカメラがロボット 2 を撮影し, ロボット 2 座標がカメラ 1 座標に対して平行な図 3 中の点線で示される状態から, 姿

Fig.2 3 identification markers for measuring angle

Fig.3 Identification markers

Fig.4 Turning id. marker n

Fig.5 Image of mobile robot

勢を変化させて実線で示す状態になる場合、撮画像平面上の識別マークの直径 D'_{2i} と識別マーク間距離 l'_i , H'_i が変化する。識別マーク直径 D と h_{0i} , H_i , I_i が既知であることから, $X_{r1}Y_{r1}Z_{r1}$ 系に対する $X_iY_iZ_i$ 系の相対位置と姿勢を得ることができる。

いまロボット1に搭載されたカメラよりロボット2に搭載された複数の識別マーク $2j$ ($j=1\sim3$)を撮影する. ロボット1のカメラレンズの焦点距離を f_1 , ロボット2の識別マークの直径を D_{I2j} , ロボット1のカメラのCCD素子上の識別マーク $2j$ の撮画像の直径を d_{I2j} とし, 識別マークの中心が光軸上付近にあると仮定する. カメラ1座標系におけるロボット2の識別マーク $2j$ の位置座標 $(x_{I2j}, y_{I2j}, z_{I2j})^T$ は, カメラ1の撮画像平面における識別マーク $2j$ の座標 u_{I2j}, v_{I2j} より下式を得る.

$$\begin{pmatrix} x_{ID2j} \\ y_{ID2j} \\ z_{ID2j} \end{pmatrix} = \frac{D_{ID2j}}{d_{ID2j} \cos \phi_{ID2j}} \begin{pmatrix} u_{ID2j} \\ v_{ID2j} \\ f \end{pmatrix} \quad \left(\tan \phi_{ID2j} = \frac{u_{ID2j}}{f} \right) \quad (9)$$

ϕ_{ID2j} は $X_{\alpha}Z_{ci}$ 平面における焦点と識別マークを結ぶ線と光軸のなす角であり、 ϕ_{ID2j} が増大すると光軸から対象物の投影像が離れ、撮画像平面上の像が歪む。 $\cos \phi_{ID2j}$ は光軸から対象物の投影像が離れた場合に像の歪みを補正するための係数である。

ロボット i 系での識別マーク 1, 2, 3 の位置ベクトルはそれぞれ

$${}^{ri}\mathbf{p}_{i1} = \begin{pmatrix} -I_2/2 \\ h_{02} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad {}^{ri}\mathbf{p}_{i2} = \begin{pmatrix} I_2/2 \\ h_{02} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad {}^{ri}\mathbf{p}_{i3} = \begin{pmatrix} -I_2/2 \\ h_{02} + H_2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

と表される. よって, カメラ1座標系をロボット2座標系原点に一致するように平行移動した座標系 $X_{clr2}Y_{clr2}Z_{clr2}$ 系において, ロボット2の各軸周りの姿勢は以下のように表わされる.

$$\begin{cases} \theta_{xc1r2} (= \theta_{pitch}) = \cos^{-1} \{ (-y_{ID21} + y_{ID23}) / H_2 \cos \theta_{zc1r2} \} \\ \theta_{yc1r2} (= \theta_{yaw}) = \cos^{-1} \{ (-x_{ID21} + x_{ID22}) / I_2 \cos \theta_{zc1r2} \} \\ \theta_{zc1r2} (= \theta_{roll}) = \sin^{-1} \{ (-y_{ID21} + y_{ID22}) / I_2 \} \end{cases} \quad (11)$$

ここで姿勢角はロボットが行動可能な状態にあると考え、 $-\pi/4 \leq \theta_{\text{yclr}2} \leq \pi/4$, $-\pi \leq \theta_{\text{yclr}2} \leq \pi$, $-\pi/4 \leq \theta_{\text{yclr}2} \leq \pi/4$ の範囲を満たすとする。また、カメラ1座標原点からロボット2座標までの位置ベクトル $\mathbf{p}_{\text{clr}2}$ は計測値より式(9), (10)から得られる。カメラ1座標系からロボット2座標系への同次変換行列を

$${}^{cl}\mathbf{T}_{r2} = \left(\frac{\mathbf{R}(Y_{cl}, \theta_{yclr2}) \mathbf{R}(Z_{cl}, \theta_{zclr2}) \mathbf{R}(X_{cl}, \theta_{xclr2})}{\mathbf{0}} \middle| {}^{cl}\mathbf{p}_{clr2} \right) \quad (12)$$

と表し、式(3)の ${}^n\mathbf{T}_{ci}$ を用いると、ロボット1-ロボット2の座標変換が得られる。

$${}^{r1}\mathbf{T}_{w2} \equiv {}^{r1}\mathbf{T}_{c1} {}^{c1}\mathbf{T}_{w2} \quad (13)$$

よって，ロボット 1-ロボット 2 の相対位置と相対姿勢を得られ，ステレオカメラ法による位置計測が可能となる．カメラ 1-カメラ

Fig.6 Measurement system

2 の相対位置と相対姿勢を求めることでも可能である。識別マークを旋回させ、画像差分を求めることでも同様の相対位置取得は可能であり、筆者らは図 4 のように、識別マークを旋回させる、カメラと一体化したユニットによる計測手法¹⁰⁾も提案している。

4. システムの検証実験

4.1 移動ロボットと計測システム

カメラを搭載した移動ロボットと、画像処理とロボットの駆動制御を行うパーソナルコンピュータ（以下PC）で構成される計測システムを試作した。

図 5 のように、直径 40mm のアクリル球を黒色に着色した識別マークを 3 個、ロボットに搭載した。識別マークはロボットの旋回中心を挟んで 80mm ($=I_l$) 離れたロッド上にあり、識別マーク 1, 2 は床面から 90mm ($=H_l$) の高さに、識別マーク 3 は 1 の直上 82mm ($=h_{oi}$) の高さに固定されている。ロボットに搭載されるカメラ (1/4"カラー CCD, 0.25Mpixel, 2.4GHz 帯無線送信機内蔵) はサーボモータ上に固定され、ロボットと独立に姿勢を変えられる。ロボットは全幅 100mm, 全長 100mm, 全高 192mm, 重量 720g である。2 相ステッピングモータ (最小分解能 0.45deg/step) により双輪駆動し、最高速度は 0.56m/s であった。(車輪間距離 91mm, 車輪直径 48mm) 電源は充電式ニッケル水素電池 12V と 9V を併用した。またロボットの姿勢の比較計測のため、3 軸加速度センサ (1V/g) と A/D コンバータ (12bit, 1.22mV/LSB) が搭載され、無線により PC ヘデータを送信する。計測システムの構成を図 6 に示す。カメラ画像は無線送信され PC (CPU: Intel Core 2 Duo 2.4GHz, RAM: 2GB) に内蔵された画像処理装置により画像情報に置き換えられる。前項 3 の計測原理に基づき、画像処理から得られた識別マークの大きさと中心間距離により、ロボットの相対姿勢および相対位置を求めることで、前項 2 のステレオカメラ法により測定対象の位置を得る。ロボットの移動やカメラ角度の変更は、PC よりモータ駆動指令を無線送信することで行う。なお、予備

実験として既知寸法の格子状パターンを撮影する方法により、カメラの焦点距離やレンズの歪みの補正係数を求めた。これらの値により、以降の実験は式(5)を用いて校正している。

4.2 識別マークの大きさと中心位置の取得方法

基礎実験として識別マークの直径と位置を正しく得るため、画像処理方法と測定環境の照明の条件について検討を行う。

本研究では2台のロボット同士の相対位置と相対姿勢を得るため、カメラの撮影画面上の識別マークの大きさと中心位置を画像処理により求めている。始めに、図7のように得られた識別マークの画像を2値化し、黒い円の幾何学図形をテンプレートとして、モルフォロジー演算によるパターンマッチングを行い、識別マークの大きさと中心位置を求める。中心位置は面積中心とする。これより推定される識別マークの中心と外周を含む矩形領域を設定し、この領域内で矩形長手方向の画素データに対しエッジ検出で輝度変化の大きな位置を求め、識別マークの両端とする。さらにこれと直交方向に、この両端距離の最大値を求め、これを識別マークの撮影画像上の直径とし、その時の線分の中間点を中心位置とする。本識別マークは球形であるためロボットの姿勢に関わらず、本手法により直径を得ることができる。しかし一般的な屋内では、識別マークは天井照明などの位置によってマーク表面の光の反射や自身の影が生じ、計測に影響すると考えられる。

そこで、光源位置を変えて識別マークを撮影し、その際の撮影画像に対し、識別マークの大きさと中心位置を求める画像処理方法について検討を行った。ロボットを他方のロボットに搭載したカメラから撮影し、画像処理において識別マークの直径を求めるエッジ処理の矩形領域の傾きを0度から135度まで変化させ、マークの大きさと中心位置を求めた。なお矩形領域の傾きは、長手方向を撮画像平面上的 u_i 方向と平行な状態を0度とした。また光源位置は図8のように、天井に設置された蛍光灯管に対し、識別マークを搭載したロボットの位置を変化させた。互いのロボット間距離は一般家庭での行動を想定し0.7mとした。2台のロボットは床面上に設置し、姿勢は互いが向き合うようにヨー角180°、ピッチ角、ロール角は0°とした。床から天井までの高さは2.9mであり、直下の床面上の照度は400Lux、2つの蛍光灯の間では380Luxであった。

識別マークの中心位置を求めた平均の結果を図9(a)に示す。矩形領域を u_i 方向(0deg.)にした場合、光源位置の変化に関わらず中心位置は真値に近い値が得られた。また、図9(b)のように直径を v_i 方向(90deg.)に求める場合や、パターンマッチングのみを用いた場合は、識別マーク表面の光源の反射の影響により、光の反射や影などで正しい値を得られなかった。

4.3 相対位置・姿勢計測実験

試作した2台のロボットを用いて、前述の式(9)~(13)によるロボット1からロボット2の座標変換により相対位置と相対姿勢を測定した。測定実験は図10のように、一方のロボットを回転ステージ上に固定して3軸方向に角度を与え、もう一方のロボットに搭載されたカメラから撮影された識別マークの画像により相対姿勢を求めた。カメラからのロボット座標原点までの距離を0.5mとし、ピッチ、ロール、ヨー角をそれぞれ0degから50degまで5deg毎に変化させた。

測定結果を図11に示す。被撮影側のロボットをヨー方向に回転ステージを回転させることで傾けると、識別マークを用いて計測したヨー角は同図(a)のように比例して増加し、ピッチ角、ロール角は変動しなかった。画像処理による誤差は最大0.4deg.

であった。与えたヨー角とほぼ同じ値を得ることができ、加速度センサの値と比較しても著しく精度が低下することはなかった。同図(b)および(c)はピッチ角およびロール角を与えた場合であるが、ヨー角を与えた場合と同様に高い計測精度を得ることができた。ロール角の誤差は同図(d)のように平均値で1deg.以内であった。また相対位置も同図(e)に示すように、真値とほぼ同じ値を得られ、計測誤差はカメラ間距離となるz方向で4%以下であった。ピッチ角で生じている計測誤差はロボットとカメラの取り付け時の寸法誤差と考えられる。

5. 位置計測実験

5.1 ステレオカメラ法位置計測方法

2台のロボットに規定の順路を周回させ、任意の位置においてステレオカメラ法による測定対象の位置計測を行った。初期位置から2台のロボットが一定距離離れ、それぞれ指令された軌跡の周回行動を行う。途中、任意の位置において測定対象の位置計測を行う。その際、カメラ間の相対位置と相対姿勢を求め、

Fig.7 Image processing

Fig.8 Positioning lights and robots

(a) Id. marker's position

(b) Detected edge

Fig.9 Result of measurement markers

Fig.10 Measurement experiment of relative posture and position

位置精度を比較した。2台のロボットの間の高低差、および測定位置における傾斜が生じるよう、床面にはロボットの駆動輪で踏破可能な板を配置し、計測開始位置の床面に任意の傾きを与えた。各ロボットの走行軌跡は、図12(a)のようにロボット上部に検出用マーカーを設け、床面から高さ3mの位置でCCDカメラにより撮影した画像から求めた。

5.2 傾斜面での周回行動におけるステレオ計測

実験は図12(b)に示す位置関係にてカメラ間の相対位置と相対姿勢を得て、測定対象のステレオ計測を行った。図12(c)のようにロボット2のみをx軸周りに5deg.傾けた面上に設置した。ステレオカメラ法における精度検証のため、本実験では測定対象として、床面に垂直な面上に直径140mmの黒丸を白紙に印刷したものをを用い、円の中心がカメラレンズと同じ高さとなるように固定した。以下に実験プロセスを示す。

- ① ロボット2台を初期位置に設置する。
- ② ロボット同士が向き合うように旋回し、ロボット間の相対位置と姿相対勢を計測する。

③ カメラを90deg.旋回し、ステレオ位置計測を行う。

④ 矩形周回行動を行いつつ、別の地点で②から③を繰り返す。

計測されたロボット2の軌跡を図12(d)に示す。天井からのカメラ画像によるロボットの位置は位置補正を行っていないため、タイヤのすべり等により周回数毎に目標軌跡との誤差が累積されている。本方式による計測結果は、各測定位置において撮影画像中の背景が異なるため精度にばらつきが生じているが、周回数が増加しても実際の位置とのずれは少なく、高い位置計測精度を保っている。また相対姿勢についても図12(e)のように、実際の姿勢 $\theta_{x2} = 5 \text{ deg.}$ 、 $\theta_{y2} = \theta_{z2} = 0 \text{ deg.}$ に近い値を得ている。測定対象のステレオ計測は図12(b)の周回軌道の各角の点において行い、測定位置の平均誤差は傾斜が無い平坦な床面上では、x方向に2~3%、z方向に0.6~0.8%であり、傾斜がある面においては図12(f)に示すように、x方向に平均4%程度、z方向に平均5%程度であった。これより床面が傾いた環境であってもステレオ位置計測が十分な精度で実現できた。

5.3 視点可変なステレオ計測

ステレオ計測は2台のカメラの画角が重複する領域でのみ位置計測が可能である。移動対象を測定する場合、対象が視差領域を超えて移動する場合が想定される。一般にステレオ計測ではカメラ間距離を大きくすれば測定位置精度を向上できるが、同時にカ

メラの画角に対する視差領域の割合が低減してしまう。そこで死角が存在する測定環境において、ロボットがそれぞれ移動や姿勢を変化することで、視差領域を確保し、死角をカバーする方法について検討を行った。測定フィールドを図13(a)に示す。2つのスペースに分けられた屋内を想定し、視界を遮る壁をフィールド中央に配置する。フィールドには、図13(b)に示すようなランドマークを8個、壁に沿って設置し、ステレオ位置計測により部屋のプロフィールを測定する。以下に実験プロセスを示す。

①～③は前述5.2節の実験プロセスと同様。

④ カメラ1を -20deg 旋回し、再度ステレオ計測を行う。

⑤ カメラ1を 40deg 、カメラ2を 20deg 旋回し、計測を行う

⑥ 指令軌跡上を移動し、別の地点で②から⑤を繰り返す

ステレオカメラ法による計測結果を図13(c)に示す。死角が存在する環境であっても、視点が旋回・移動することで、全てのランドマークを位置計測できることがわかる。ロボット1, 2の軌跡と指令値の誤差が著しく大きくなってもステレオカメラ法による位置計測の値はx方向が $\pm 0.2\text{m}$ 、z方向が $\pm 0.25\text{m}$ に留まった。図13(d)のように累積移動距離が増加するとデッドレコニングでは誤差が増加するが、本手法では計測位置精度を一定値に収めることができる。累積25mの移動における位置計測誤差は本手法で 0.15m 以内であり、デッドレコニングでは最大 1.8m であった。ロボットが互いの相対位置を求める際に撮影する他方のロボットの識別マークは、周回中の相対位置ずれにより画角の中央に収まらない場合があり、レンズ等の歪み等により誤差が生じた。また本機構はピッチ方向のカメラ角度補正が不可能であるため、ロボットが大きくピッチ方向に傾いた場合、位置計測対象や他方のロボットの識別マークが画角を外れる場合があった。加えて、本実験では表面に識別コードを標記したランドマークを用いたため、計測点の対応が容易であったが、実環境での計測では計測点の対応を得ることが必要である。加えて、2台のカメラの撮画像平面が直交する場合では計測位置を得られない課題を有する。

デッドレコニングにおける累積誤差は、用いるセンサの精度によって決定されるが、0にすることは不可能で長期の計測では、累積誤差を補償する必要がある。比較的、移動距離が短い間は、デッドレコニングによる計測の精度に差がないため、本方式により定期的なロボット間の相対姿勢と相対位置の補償を行うことで、相対位置・相対姿勢を測定する時間を省き、より効率的な位置計測が可能になると考えられる。

6. 結 言

本研究では、次のような結果を得た。

- (1) 単眼の移動ロボット群によるステレオカメラ法を用いて、傾きがある床面上において光軸方向に平均4%、それと垂直な方向に平均5%の位置計測精度を得た。また水平な床面上的計測精度は光軸方向に0.8%以下、それと垂直な方向に3%以下であった。
- (2) 照明が画像計測に与える影響について検討し、球状の識別マークを用いて輝度変化の方向により、照明位置の変化の影響を受け難くすることが可能であった。
- (3) デッドレコニングにより相対位置と相対姿勢を推定した場合、累積移動距離が増加すると位置計測精度は増加したが、本手法では一定の誤差を保つことができた。

Fig.13 Measurement result at the place where there is a blind spot

- (4) 測定環境に遮蔽物がある場合においても視点を旋回、移動させることでステレオカメラ法による位置計測が可能であった。

参 考 文 献

- 1) 倉爪亮, 本村暁, 山口祐規, 松岡毅, 山本元司, 長谷川勉, “全方位カメラとデッドレコニング機能を有するサッカーロボットのロバストな自己位置同定手法”, 日本ロボット学会誌, **22**, 3, (2004)343.
- 2) 田畑尚弘, 堤喜代司, 平井宏, 弓場芳治, “屋外移動ロボットのための情景画像を利用した位置推定法”, テレビジョン学会誌, **44**, 6, (1990)752.
- 3) 川西亮輔, 山下淳, 金子透, “全方位画像中の特徴点と直線エッジの同時拘束と基線長の自動決定に基づく Structure from Motion による三次元環境モデル生成”, 日本ロボット学会誌, **30**, 4, (2012)399.
- 4) 城井壮一郎, 細田耕, 浅田稔 “2台のカメラを用いたマニピュレータの平面障害物回避軌道の生成”, 情報処理学会研究報告, **96**, 47, (1996) 93.
- 5) Alessandro Moro, Enzo Mumolo, Massimiliano Nolic, Kenji Terabayashi, Kazunori Umeda ” Dynamic background modeling for moving objects detection using a mobile stereo camera”, The 8th France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, (2010)143.
- 6) 森谷貴行, 日浦慎作, 佐藤宏介, “ステレオカメラを利用した自己位置・姿勢の実時間推定とシーンの同時モデリング”, 電子情報通信学会論文誌, **J90-D**, 6 (2007) 1579.
- 7) 小田倉聡司, 阿部亨, 木下哲男 “遮蔽に頑健な多眼ステレオ法”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU, **105**, 478, (2005)37.
- 8) 清水毅, 小谷真司, 渡邊寛望, 丹沢勉, 古谷信幸, “エビボラ平面上に曲線を配置することによるステレオ画像計測”, 精密工学会誌, **79**, 4, (2013)332.
- 9) 笹木亮, 酒井良郎, 小原治樹, “移動ロボットを用いたステレオカメラ法による相対位置取得方法の検討”, 精密工学会誌, **77**, 5, (2011)490.
- 10) T. SASAKI, T. USHIMARU, T. YAMATANI, Y. IKEMOTO and H. OBARA, “Pivot Turning Measurement of Relative Position and Posture for Mobile Robot System Using Stereo-camera Method”, ICPE (2012) D17.